پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۵۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹
ص ۶۵۷- ۶۴۱

پایش غلظت فلزات سنگین ناشی از طوفان گردوغبار در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس

برومند صلاحی* ـ استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی
محمود بهروزی ـ دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشگاه ملایر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

چکیده

فلزات سنگین در ذرات غبار نقش مهمی در آلودگی خاک‌های کشاورزی دارنـد کـه بـا شـناخت آن گـام مهمـی در پیشگیری از اثرهای بهداشتی آن برداشته خواهد شد. در این پژوهش فراوانی طوفان‌های گردوغبار در ایستگاه‌های داراب، جهرم، فسا، و لار در بازهٔ زمانی ۱۶ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۵) بررسی و با مدل‌های اسپلیت ردیـابی شـد. بـرای شناسایی غلظت فلزات سنگین در خاک زراعی گندم، ۱۶ نمونه خاک زراعی از عمق صفر تـا ۵ سـانتی‌متـری در دو زمان قبل (فصل زمستان) و بعد از طوفان‌های گردوغبار (فصل تابستان) برداشته شد و در آزمایشگاه با اسـتفاده از دستگاه جذب اتمی به روش شعله غلظت‌ها اندازه‌گیری شد و با شاخص زمین‌انباشتگی ارزیابی شد. نتـایج نشـان داد بیشینهٔ طوفان‌های گردوغبار در بهار و اوج آن در ایستگاه فسا و جهرم بود که ذرات غبار از بیابان‌هـای عـراق و ربع‌الخالی به‌واسطهٔ بادهای شمال انتقال یافته‌اند. غلظت فلزات سـنگین در خـاک نشـان داد کـه فلـزات سـرب و کادمیوم در زمان بعد از گردوغبار نسبت به زمان قبـل افـزایش یافت و اخـتلاف آن‌هـا در سـطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ معنی‌دار بود. شاخص آلودگی زمین‌انباشتگی نشان داد غلظت فلزات در اکوسیستم‌های زراعـی داراب و لار بـیش از حد مجاز بوده و در طبقهٔ آلودگی شدید قرار گرفتند.

واژگان کلیدی: استان فارس، جذب اتمی، سرب، شاخص زمین‌انباشتگی، مدل های اسپلیت.

مقدمه

فلزات سنگین جزو خطرناک‌ترین آلاینده‌های محیط زیست‌اند که قادرند در سیستم بدن موجودات زنده تجمع یابند و غلظت آن‌ها با گذشت زمان و با تماس بیشتر با آلاینده‌ها افزایش می‌یابد (بهروش و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۴۱). فلزات سنگین عمدتاً به دسته‌ای از گروه عناصر فلزی گفته می‌شود که دارای وزن مخصوص بیشتر از ۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و وزن اتمی بیشتر از ۵۰ گرم باشند. مهم‌ترین فلزات سنگین، که از دیدگاه حفاظت از محیط زیست دارای اهمیت‌اند، شامل کادمیوم، آرسنیک، کبالت، وانادیوم، روی، جیوه، آهن، منگنز، نیکل، سرب، کروم، و مس است کهـ به دلیل غیرقابل تجزیه بودن در طبیعت و طول عمر زیستی بالاـ آلایندهٔ بسیار مهم محیط زیستی محسوب می‌شوند (اتابکی و لطفی، ۱۳۹۷: ۲۳).

اگرچه آلوده‌شدن زمین‌های کشاورزی به فلزات از راه‌های شیمیایی همچون کاربرد لجن فاضلاب، کودهای شیمیایی، و پساب‌های صنعتی است، رسوب ذرات غبار خشک و تر ناشی از پدیدهٔ طوفان گردوغبار نیز یکی از مهم‌ترین منابع آلوده‌کنندهٔ اکوسیستم‌های زراعی گندم به فلزات سنگین محسوب می‌شود (آلتاس، ۲۰۰۹: ۱۵۵۲). ذرات گردوغبار بر

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۴۵۱۵۹۲۲
Email: salahi@uma.ac.ir

اساس محل شکل‌گیری و مسیر حرکت قادرند فلزات سنگین را حمل کنند. سمی‌بودن، تجزیه‌ناپذیری، و تجمع‌پذیری فلزات سنگین سبب شده تا ذرات گردوغبار حامل این فلزات همواره مشکل‌آفرین باشند (خوزستانی و سوری، ۲۰۱۳: ۱۳۴۸). منابع انسانی در نواحی شهری و نیز الگوهای فرسایش خاک در تجمع فلزات سنگین اثر دارند (جارادات و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۳۹). رسوب ذرات غبارآلوده به فلزات سنگین در زمین‌های زراعی به ترکیب آن با محلول خاک منجر می‌شود و گیاهان با جذب این فلزات سنگین مسیر اصلی انتقال فلزات به زنجیرهٔ غذایی را هموار می‌کند. ذرات گردوغبار ناشی از فعالیت‌های صنعتی، ترافیک و تردد خودروها، عملیات کشاورزی و فرسایش خاک در مناطق بیابانی است که تحت شرایط اتمسفری و تشدید سرعت باد به صورت معلق وارد جو می‌شود و با کاهش سرعت باد در محیط میزبان رسوب می‌کند. بسته به منشأ ذرات غبار، نوع فلزات سنگین نیز در آن متفاوت است؛ به‌گونه‌ای‌که فلزات مس، نیکل، کادمیوم، کبالت، کروم، و روی در ارتباط با فعالیت‌های صنعتی و فلزات سرب و منگنز در ارتباط با ریزگردهای بیابانی است (تکالیگلو و کارتال، ۲۰۰۶: ۲۷۹۷). در چین فلزات مس، منگنز، و روی ناشی از فعالیت‌های صنعتی، اما کروم و نیکل از عملیات کشاورزی و فرسایش خاک‌های بیابانی نشئت می‌گیرد (لو و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۰۸۵). در ایران نیز منشأ احتمالی فلزات سنگین در ذرات غبار بررسی شده و نتایج آن در کرمانشاه بیانگر این است که فلزات روی، مس، نیکل، و کروم عمدتاً منشأ انسانی و آهن و منگنز منشأ طبیعی دارند. همچنین، غلظت فلزات سنگین در ارتباط با منشأ ذرات غبار متفاوت است؛ به‌طوری‌که در طوفان‌های گردوغبار مناطق غربی ایران، که از رسوبات آبرفتی و ذرات لس در مسیل‌های خشک دجله و فرات نشئت می‌گیرد، فلز آهن شناخته‌شده‌ترین عنصر است که در شهرهای سنندج، خرم‌آباد، و اندیمشک برتری مطلقی در مقایسه با دیگر فلزات دارد که این دلیلی بر بیابانی‌بودن ذرات گردوغبار است. البته، بر اساس شاخص غنی‌شدگی، سطوح آلودگی نقره و کروم در ذرات غبار ورودی به غرب ایران بیش از آرسنیک و روی است (رجبی و سوری، ۱۳۹۴: ۱۱). در گردوغبار کرمانشاه نیز آهن و روی فلزات سنگین غالب‌اند. نزدیک‌بودن غلظت آهن نسبت به خاک‌های جهان نشان از منشأ طبیعی این فلز دارد؛ اما بالابودن غلظت فلزات روی، مس، نیکل، و کروم در گردوغبارهای باریده در کرمانشاه (احمدی دوآبی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۹) و تهران (سلمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۹) بیانگر دخالت انسان همچون فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی در تولید فلزات سنگین است که این فلزات با انباشت در سطح خاک خاک‌های کشاورزی را با مشکل آلودگی همراه می‌کند و سبب اختلال در چرخهٔ اکوسیستم محیطی می‌شود.

استان فارس در جنوب غربی ایران یکی از مناطق پهناور است که ورود تودهٔ عظیم گردوغبار اکوسیستم‌های زراعی گندم آن را متأثر می‌کند. رسوب ذرات غبار همراه با فلزات سنگین در خاک‌های سطحی مزارع، به‌دلیل تجمع زیستی آن، به انباشت فلزات سنگین در خاک منجر می‌شود و گیاه گندم با جذب آن باعث انتقال این فلزات سمی به چرخهٔ غذایی انسان می‌شود. غلات اساس تغذیه و حیات انسان به‌شمار می‌رود و تأمین‌کنندهٔ ۷۰ درصد غذای انسان‌هاست (کیان‌پور و سبحان اردکانی، ۱۳۹۶: ۸۳). بنابراین، رسوب ذرات غبار آغشته به فلزات سنگین در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم می‌تواند سلامت انسان‌ها را به خطر بیندازد؛ شناسایی محتوای فلزات سنگین در خاک زمین‌های زراعی گندم اولین اقدام در کاهش مخاطرهٔ سلامت محسوب می‌شود که این پژوهش سعی در دست‌یابی به این رهیافت است.

مواد و روش‌ها

استان فارس با مرکزیت شهرستان شیراز در جنوب غربی ایران قرار گرفته و وسعت آن حدود ۱۲۲۶۰۴ کیلومترمربع است که معادل ۷٫۵ درصد از مساحت کل کشور است. استان فارس یکی از قطب‌های کشت گندم در ایران است که پس از

خوزستان در رتبهٔ دوم کشوری قرار دارد. سطح زیر کشت گندم در این استان ۳۵۵٫۵۲۹ هکتار بوده که ۲۷۶٫۵۵۲ هکتار آبی و ۷۸٫۹۷۷ هکتار نیز به صورت دیم است که ۱۰٫۱ درصد گندم کشور را تولید می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور شناسایی اثر گردوغبار بر غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی گندم در مناطق جنوبی استان فارس، نخست کدهای مربوط به گردوغبار (۰۶، ۰۷، ۰۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، و ۳۵) در بازهٔ زمانی ۱۶ساله (۲۰۰۰–۲۰۱۵) مربوط به ایستگاه‌های لار، جهرم، داراب، و فسا از سازمان هواشناسی اخذ و فراوانی این پدیده در مقیاس فصلی و سالانه بررسی شد. سپس، مسیر ورود ذرات غبار به محدودهٔ مطالعاتی در مطالعهٔ موردی طوفان گردوغبار ۱۲ می ۲۰۱۸ با مدل ردیابی های‌اسپلیت[1] انجام شد. همچنین، برای شناسایی علت وقوع طوفان گردوغبار در روز منتخب از نقشهٔ فشار تراز دریا استفاده شد.

در ادامه، از خاکِ زمین‌های زراعی گندم شهرستان‌های لار، فسا، داراب، و جهرم نمونه‌برداری شد؛ به‌گونه‌ای‌که در هر شهرستان موردمطالعه چهار اکوسیستم زراعی گندم مشخص شد و عملیات نمونه‌برداری خاک از عمق یک سانتی‌متری در سطح ۴۰۰ سانتی‌متر مربع از هر اکوسیستم زراعی گندم صورت گرفت. نمونه‌برداری خاک به دو مرحلهٔ قبل و بعد از طوفان گردوغبار تقسیم شد. نمونه‌برداری قبل از طوفان گردوغبار در ماه‌های دی و اسفندماه ۱۳۹۷ و نمونه‌برداری بعد از طوفان گردوغبار در ماه‌های اردیبهشت و خرداد ۱۳۹۸ انجام شد.

نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال داده شد و با استفاده از دستگاه جذب اتمی به روش شعله غلظت فلزات سنگین شامل سرب، کادمیوم، و نیکل اندازه‌گیری شد. برای اینکه مشخص شود طوفان گردوغبار بر غلظت فلزات سنگین در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس اثر دارد، از آزمون تی– استیودنت استفاده شد. درنهایت، مقادیر فلزات سنگین در نمونه‌های گردوغبار با شاخص زمین‌انباشتگی[2] ارزیابی شد که این شاخص بر طبق معادلهٔ ۱ آلودگی به فلزات سنگین را با توجه به نسبت غلظت هر فلز سنگین در نمونهٔ موردبررسی به غلظت زمینه‌ای (ژوان و همکاران، ۲۰۰۴) آن فلز در پوستهٔ زمین محاسبه می‌کند:

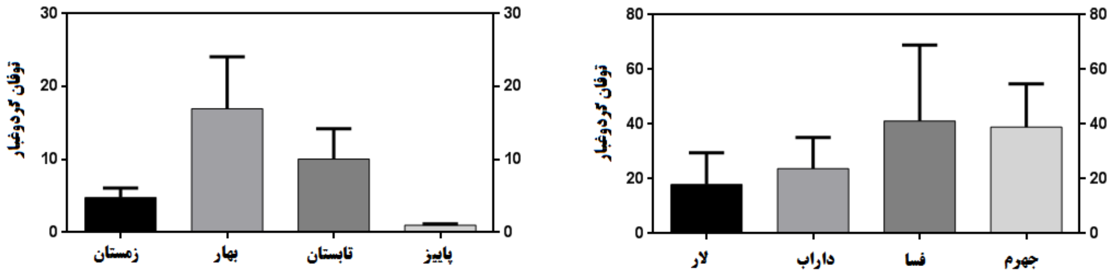
$$I_{geo} = \log_2 \left(C_n / 1.5\, B_n \right) \quad (۱)$$

که در آن، I_{geo} معرف شاخص زمین‌انباشتگی، C_n غلظت اندازه‌گیری‌شدهٔ فلز سنگین در نمونه، و B_n غلظت زمینه‌ای همان فلز سنگین در پوستهٔ زمین است. ضریب ۱٫۵ نیز برای کمینه‌کردن تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه‌ای ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی اعمال می‌شود. این شاخص برای میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی گندم منطقهٔ موردمطالعه محاسبه و نقشهٔ پهنه‌بندی آن‌ها با مدل آی–دی– دبلیو[3] در محیط جی‌آی‌اس ترسیم شد.

یافته‌های پژوهش

شکل ۱ میانگین وقوع طوفان گردوغبار در چهار ایستگاه منطقه ـ شامل لار، جهرم، داراب، و فسا ـ را در مقیاس فصلی نشان می‌دهد که بر اساس آن بیشینهٔ فراوانی این پدیده در نیمهٔ گرم سال، به‌ویژه در فصل بهار، و کمینهٔ آن در نیمهٔ سرد سال، به‌ویژه در پاییز، است. در بین ایستگاه‌های منطقه، فسا با ۴۲ وقوع دارای بیشینهٔ فراوانی گردوغبار سالانه است؛ پس از آن ایستگاه‌های جهرم، داراب، و لار به‌ترتیب با میانگین سالانهٔ ۳۹، ۲۵، و ۱۹ طوفان در رتبهٔ بعد قرار دارند.

1. HYSPLIT
2. Geo-Accumulation Index Igeo
3. IDW

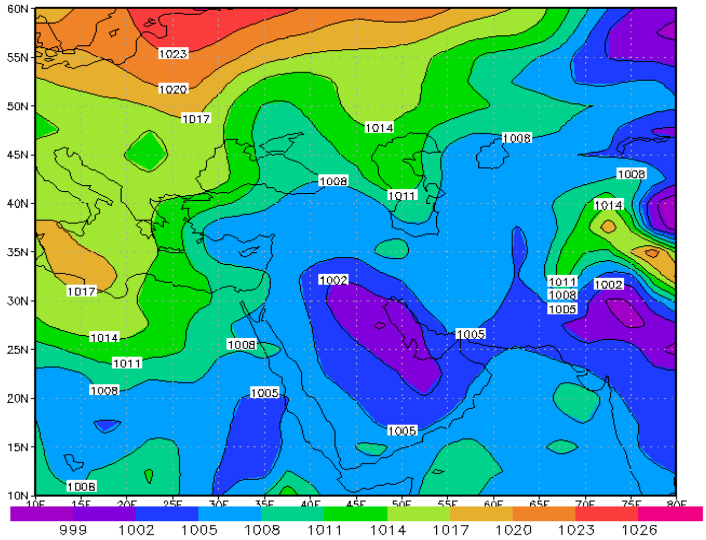


شکل ۱. میانگین فراوانی فصلی- مکانی طوفان‌های گردوغبار در اکوسیستم‌های زراعی جنوب استان فارس (منبع: نگارندگان)

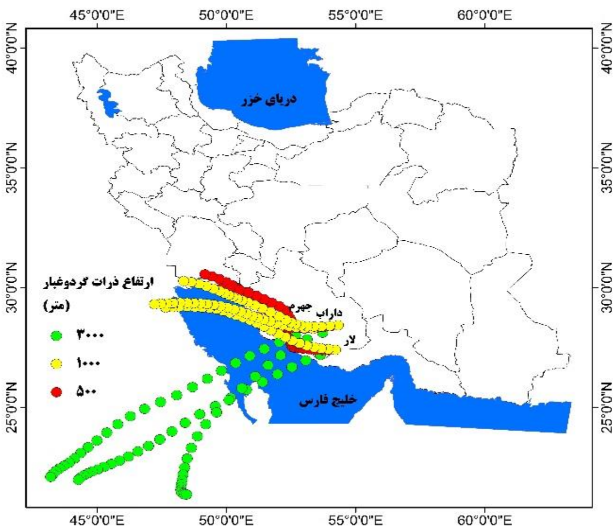
طوفان گردوغبار در ۱۲ می ۲۰۱۸ (۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۷)

بررسی نقشهٔ فشار سطح زمین در روز ۱۲ می ۲۰۱۸ نشان داد که سیستم فروبار حرارتی در هند و پاکستان و حتی ایران را فراگرفته است و یک هستهٔ کم‌فشار با مرکزیت ۱۰۰۱ میلی‌بار در خلیج‌فارس مستقر شده است؛ اما در جنوب اروپا، به‌ویژه دریای مدیترانه، سیستم فرابار دینامیکی با مرکزیت ۱۰۱۷ میلی‌بار تشکیل شده که تقابل این سیستم‌های فرابار و فروبار به منقلب‌شدن اتمسفر سطوح پایین منجر شده است (شکل ۲). فروبار حرارتی خلیج‌فارس باعث مکش هوای اطراف به مرکز شده و هوای گرم و خشک ناشی از زبانهٔ فرابار شمال افریقا و دریای مدیترانه به سمت فروبار حرارتی خلیج‌فارس جریان یافته‌اند که به‌عنوان بادهای شمال شناخته می‌شود. بادهای شمال، با عبور از بیابان‌های حاشیهٔ جنوبی و غربی خلیج‌فارس، ذرات خاک سطحی بیابان‌ها را روبیده و به صورت تودهٔ عظیم گردوغبار به سمت سیستم فروبار خلیج‌فارس انتقال یافته است. استان‌های فارس و هرمزگان، که در مجاورت دریای خلیج‌فارس قرار دارند، بخش عظیمی از این ذرات غبار را که رطوبت نیز به خود جذب کرده‌اند دریافت می‌کند و در روز ۱۲ می ۲۰۱۸ بادهای شمال باعث وقوع طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های جنوبی و مرکزی استان فارس شد.

در این پژوهش مسیر ورود ذرات غبار به منطقهٔ موردمطالعه در ۱۲ می ۲۰۱۸ با روش پسگرد مدل های‌اسپلیت ردیابی شد. همان‌طورکه در شکل ۳ نمایان است، ذرات غبار در ارتفاع ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری به‌واسطهٔ بادهای شمال از سمت غرب و جنوب وارد ایستگاه‌های جنوبی استان فارس شده است؛ اما در ارتفاع ۳۰۰۰ متری، ذرات غبار تحت شرایط ناپایداری اتمسفر از بیابان‌های مرکزی عربستان به سمت ایران جریان یافته است. ایستگاه‌های دیده‌بانی هواشناسی در منطقهٔ موردمطالعه نیز کد هواشناسی طوفان گردوغبار را گزارش کرده که به صورت فرامحلی وارد منطقه شده است؛ بنابراین، با استناد به تحلیل نقشهٔ فشار تراز دریا و همچنین مدل های‌اسپلیت، که ذرات غبار را منشأ ردیابی می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که ذرات غبار در روز مورد مطالعه از سمت بیابان‌های عربستان و عراق وارد استان فارس شده است. از طرف دیگر، به‌علت اینکه این طوفان در ماه می (اوایل اردیبهشت‌ماه) اتفاق افتاده است و در مرحلهٔ فنولوژی سبزینگی گیاهان بوده و سطح اراضی خشک منطقه اغلب از گیاهان مرتعی یک‌ساله پوشیده است، گردوغبار محلی نمی‌تواند نقش پُررنگی در افزایش غلظت غبارها داشته باشد.



شکل ۲. نقشهٔ فشار سطح زمین در روز وقوع طوفان گردوغبار در جنوب ایران (۱۲ می ۲۰۱۸) (منبع: نگارندگان)



شکل ۳. خروجی مدل های‌اسپلیت و مسیر ورود گردوغبار به جنوب استان فارس (منبع: نگارندگان)

پراکنش فلزات سنگین

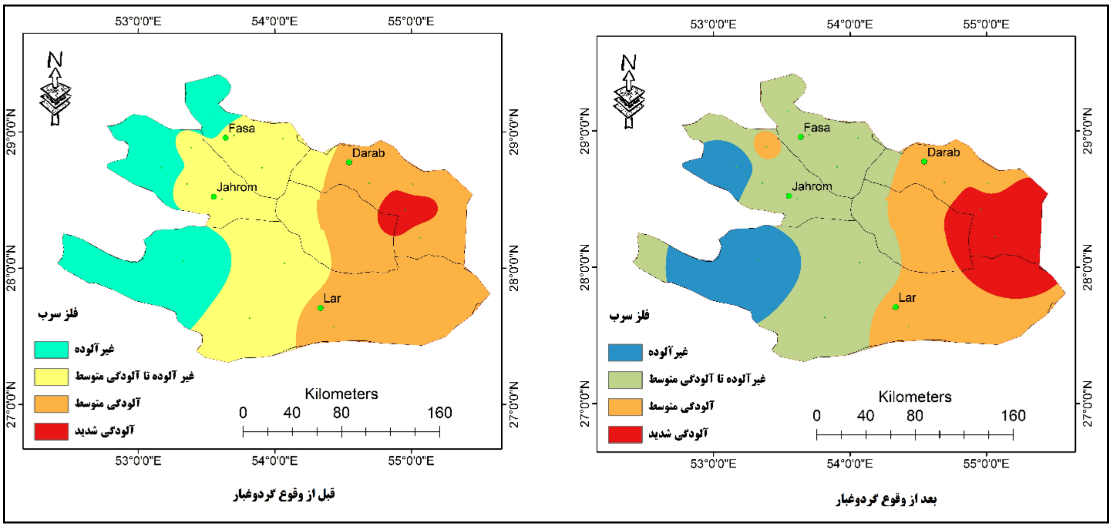
نتایج حاصل از اندازه‌گیری فلز سرب در خاک‌های سطحی اکوسیستم زراعی گندم در مناطق موردمطالعه نشان داد غلظت سرب در زمان قبل از وقوع طوفان‌های گردوغبار (فصل زمستان) کمتر از غلظت آن در بعد از وقوع طوفان‌های گردوغبار (تابستان) بود و بیشترین اختلاف را می‌توان در خاک اکوسیستم‌های زراعی لار مشاهده کرد و کمترین اختلاف هم در جهرم و فسا بود. در زمان قبل از طوفان گردوغبار، بیشترین میانگین غلظت سرب در اکوسیستم‌های زراعی داراب بود که ۳۴/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد؛ اما، در همین منطقه، غلظت سرب در فصل تابستان که پس از وقوع طوفان‌های گردوغبار اندازه‌گیری‌ها انجام شد، غلظت سرب به ۳۸/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. کمترین غلظت سرب نیز در بین ایستگاه‌ها در خاک‌های سطحی اکوسیستم زراعی جهرم بود (جدول ۱).

جدول ۱. ویژگی‌های آماری غلظت سرب در زمان قبل و بعد از وقوع طوفان‌های گردوغبار

متغیر		منطقه	میانگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	واریانس	انحراف معیار	حداکثر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	حداقل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ضریب تغییرات (درصد)
سرب	قبل	لار	۲۹	۲۶/۱	۵/۱	۳۶	۲۱	۱۷/۶
		فسا	۲۶/۱	۲۳/۳	۴/۸	۳۲	۱۷	۱۸/۴
		داراب	۳۴/۱	۳۴/۵	۵/۸	۴۲	۲۳	۱۷/۲
		جهرم	۲۴/۹	۳۹/۲	۶/۲	۳۳	۱۱	۲۵/۱
	بعد	لار	۳۷/۳	۴۹/۵	۷	۵۱	۲۹	۱۸/۸
		فسا	۲۸/۴	۱۵	۳/۸	۳۳	۲۰	۱۳/۶
		داراب	۳۸/۸	۴۲/۷	۶/۵	۵۲	۲۹	۱۶/۸
		جهرم	۲۶/۳	۲۱/۳	۴/۶	۳۳	۱۹	۱۷/۵

(منبع: نگارندگان)

بر اساس میانگین فاکتور آلودگی زمین‌انباشتگی که نتایج آن در زمان قبل و بعد از وقوع طوفان‌های گردوغبار محاسبه شد، به صورت نقشهٔ پهنه‌بندی ارائه شده است (شکل ۴). در زمان قبل از وقوع طوفان‌های گردوغبار در منطقه، میزان آلودگی از نظر غلظت سرب در طبقهٔ غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارد و فقط یک اکوسیستم زراعی گندم در داراب دارای آلودگی شدید بود. پس از وقوع طوفان‌های گردوغبار، اکوسیستم‌های زراعی در داراب و لار عمدتاً دارای آلودگی متوسط و شدید بود؛ اما اکوسیستم‌های زراعی جهرم و فسا از لحاظ آلودگی به فلز سرب در طبقهٔ غیرآلوده و آلودگی متوسط قرار گرفتند. بنابراین، طوفان‌های گردوغبار به افزایش غلظت فلز سرب در داراب و لار منجر شده است.



شکل ۴. پهنه‌بندی آلودگی فلز سرب در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس با شاخص زمین‌انباشتگی (منبع: نگارندگان)

کادمیوم، که عنصری غیرضروری برای فرایندهای متابولیسم گیاه است و از تحرک‌پذیری بالایی در خاک برخوردار است، در منطقهٔ موردمطالعه پس از وقوع طوفان‌های گردوغبار شدیداً افزایش یافت و در خاک اکوسیستم‌های زراعی لار

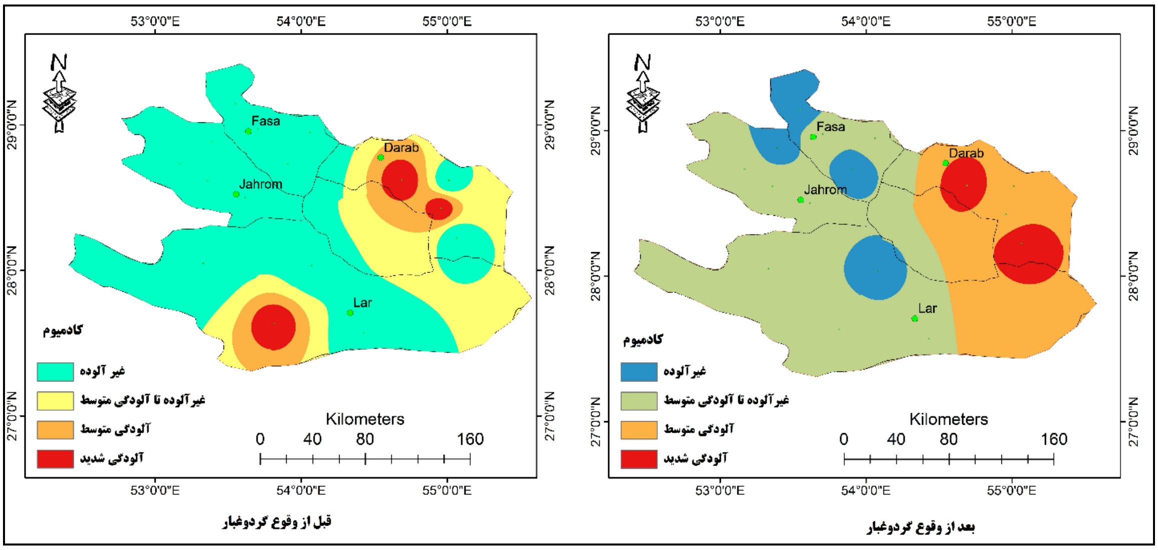
و داراب افزایش چشم‌گیری داشت؛ اما در فسا و جهرم غلظت آن نسبت به زمان قبل از وقوع طوفان گردوغبار افزایش زیادی نداشت (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های آماری غلظت کادمیوم در زمان قبل و بعد از وقوع طوفان‌های گردوغبار

	متغیر	منطقه	میانگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	واریانس	انحراف معیار	حداکثر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	حداقل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ضریب تغییرات (درصد)
قبل	کادمیوم	لار	۰/۷۴	۰/۱۱	۰/۳۳	۱/۳	۰/۲	۴۵
		فسا	۰/۶۵	۰/۰۷	۰/۲۷	۱/۱	۰/۳	۴۲
		داراب	۰/۸۰	۰/۰۷	۰/۲۶	۱/۳	۰/۲	۳۳
		جهرم	۰/۵۶	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۹	۰/۳	۴۲
بعد		لار	۱/۱۳	۰/۰۷	۰/۲۶	۱/۶	۰/۷	۲۳/۴
		فسا	۰/۶۹	۰/۰۵	۰/۲۲	۱/۱	۰/۴	۳۲/۶
		داراب	۱/۲۸	۰/۲۲	۰/۴۷	۱/۹	۰/۳	۳۷/۱
		جهرم	۰/۶۳	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۹	۰/۴	۲۷/۳

(منبع: نگارندگان)

نتایج حاصل از بررسی فلز کادمیوم با شاخص زمین‌انباشتگی در منطقهٔ مورد مطالعه نشان داد (شکل ۵) که در زمان قبل از وقوع طوفان‌های گردوغبار، عمدهٔ خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس از نظر میزان آلودگی به کادمیوم در طبقهٔ غیرآلوده قرار داشتند و فقط بخش کوچکی از اکوسیستم‌های داراب و لار در بخش آلودگی شدید قرار گرفتند؛ اما با شروع طوفان‌های گردوغبار غلظت این فلز افزایش یافت و اغلب اکوسیستم‌های زراعی گندم در طبقهٔ آلودگی قرار گرفتند. بیشینهٔ غلظت کادمیوم نیز در اکوسیستم‌های زراعی داراب مشاهده شد.



شکل ۵. پهنه‌بندی میزان آلودگی فلز کادمیوم در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس با شاخص زمین‌انباشتگی (منبع: نگارندگان)

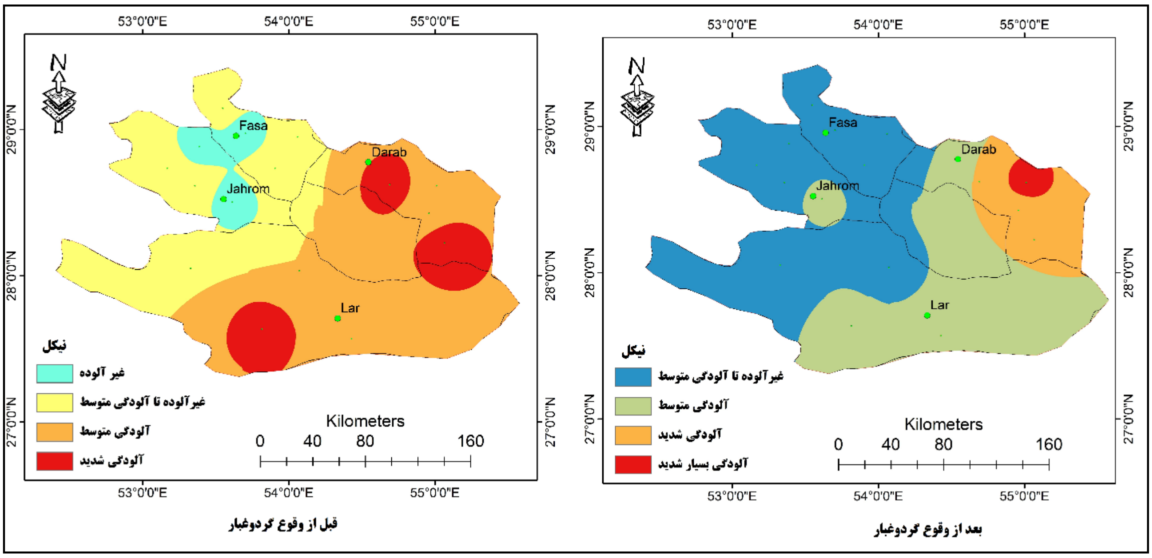
جدول ۳ نشان می‌دهد که در زمان قبل و بعد از وقوع گردوغبار حداکثر غلظت نیکل در داراب و لار و حداقل آن جهرم بود.

جدول ۳. ویژگی‌های آماری غلظت نیکل در زمان قبل و بعد از وقوع طوفان‌های گردوغبار

	متغیر	منطقه	میانگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	واریانس	انحراف معیار	حداکثر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	حداقل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ضریب تغییرات (درصد)
قبل	نیکل	لار	۶۰٫۲	۳۰	۵٫۴	۶۸	۴۹	۹٫۱
		فسا	۵۴٫۳	۴۱٫۷	۶٫۴	۶۵	۴۱	۱۱٫۸
		داراب	۶۱٫۲	۶۹٫۶	۸٫۳	۷۲	۳۵	۱۳٫۶
		جهرم	۴۷٫۷	۱۲۰	۱۰٫۹	۶۲	۱۵	۲۲٫۹
بعد		لار	۶۲٫۲	۴۳٫۱	۶٫۵	۷۲	۴۹	۱۰٫۵
		فسا	۵۵٫۵	۳۲	۵٫۶	۶۵	۴۴	۱۰٫۱
		داراب	۶۳٫۸	۲۳٫۹	۴٫۹	۷۳	۵۵	۷٫۶
		جهرم	۴۹٫۵	۱۲۳٫۳	۱۱٫۱	۶۲	۱۷	۲۲٫۴

(منبع: نگارندگان)

نتایج حاصل از مقایسهٔ غلظت نیکل با شاخص آلودگی زمین‌انباشتگی در زمان قبل و بعد از وقوع گردوغبار نشان داد غلظت این فلز پس از رخداد پدیدهٔ گردوغبار افزایش یافت و بیشینهٔ آن را می‌توان در داراب و لار مشاهده کرد که در طبقهٔ آلودگی متوسط تا بسیار شدید قرار گرفتند. فسا و جهرم حتی پس از وقوع گردوغبار در طبقهٔ غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار گرفتند؛ بنابراین، طوفان‌های گردوغبار بیشترین تأثیر را بر خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی گندم در داراب و لار گذاشتند (شکل ۶).



شکل ۶. پهنه‌بندی میزان آلودگی فلز نیکل در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس با شاخص زمین‌انباشتگی (منبع: نگارندگان)

پراکنش مکانی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های زراعی گندم

نتایج حاصل از مقایسهٔ میانگین تی- استیودنت نشان داد که در خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی گندم لار، به‌جز نیکل، گردوغبار به افزایش دیگر غلظت فلزات سنگین منجر شد و اختلاف غلظت آن‌ها در زمان قبل و بعد از وقوع گردوغبار در سطح ۰٫۰۱ معنادار بود (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسهٔ میانگین غلظت فلزات سنگین در قبل و بعد از گردوغبار در اکوسیستم‌های زراعی گندم در لار

	فلز سنگین		قبل از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	بعد از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آزمون تی- استیودنت	سطح معناداری
لار	Pb	سرب	۲۹	۳۷٫۳	-۳٫۴۹	۰٫۰۰۳**
	Cd	کادمیوم	۰٫۷۴	۱٫۱۳	-۳٫۸۲	۰٫۰۰۲**
	Ni	نیکل	۶۰٫۲	۶۲٫۲	-۱٫۸۳	۰٫۰۸۶

(منبع: نگارندگان)

در اکوسیستم‌های زراعی فسا، اختلاف میانگین غلظت سرب و نیکل در زمان قبل و بعد از وقوع گردوغبار در سطوح ۰٫۰۵ معنادار بود و نتایج آن بیانگر این است که گردوغبار به افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی فسا منجر شده است (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسهٔ میانگین غلظت فلزات سنگین در قبل و بعد از گردوغبار در اکوسیستم‌های زراعی گندم در فسا

	فلز سنگین		قبل از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	بعد از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آزمون تی- استیودنت	سطح معناداری
فسا	Pb	سرب	۲۶٫۱	۲۸٫۴	-۲٫۹۵	۰٫۰۱*
	Cd	کادمیوم	۰٫۶۵	۰٫۶۹	-۱٫۸۱	۰٫۰۸۹
	Ni	نیکل	۵۴٫۳	۵۵٫۵	-۲٫۶۳	۰٫۰۱۹*

(منبع: نگارندگان)

در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم داراب، که غلظت فلزات سنگین بیشتر از دیگر شهرستان‌ها بود، اختلاف غلظت فلزات در قبل و بعد از وقوع گردوغبار به‌جز عنصر نیکل در سطح ۰٫۰۱ معنادار بود و گردوغبار به افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک منجر شد (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسهٔ میانگین غلظت فلزات سنگین در قبل و بعد از گردوغبار در اکوسیستم‌های زراعی گندم در داراب

	فلز سنگین		قبل از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	بعد از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آزمون تی- استیودنت	سطح معناداری
داراب	Pb	سرب	۳۴٫۱	۳۸٫۸	-۳٫۲۷	۰٫۰۰۵**
	Cd	کادمیوم	۰٫۸۰	۱٫۲۸	-۴٫۴۳	۰٫۰۰۰**
	Ni	نیکل	۶۱٫۲	۶۳٫۸	-۱٫۸۱	۰٫۰۹۰

(منبع: نگارندگان)

در شهرستان جهرم، که کمترین غلظت فلزات سنگین را در خاک سطحی اکوسیستم‌های زراعی نسبت به دیگر شهرهای موردمطالعه داشت، اختلاف قبل و بعد از وقوع گردوغبار در دو فلز سرب و کادمیوم معنادار بود. (جدول ۷).

جدول ۷. مقایسهٔ میانگین غلظت فلزات سنگین در قبل و بعد از گردوغبار در اکوسیستم‌های زراعی گندم در جهرم

	فلز سنگین		قبل از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	بعد از گردوغبار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	آزمون تی- استیودنت	سطح معناداری
جهرم	Pb	سرب	۲۴٫۹	۲۶٫۳	-۲٫۲۷	۰٫۰۳۸*
	Cd	کادمیوم	۰٫۵۶	۰٫۶۳	-۳٫۴۶	۰٫۰۰۳**
	Ni	نیکل	۴۷٫۷	۴۹٫۵	-۱٫۳۲	۰٫۲۰۶

(منبع: نگارندگان)

بحث و نتیجه‌گیری

روند روزهای گردوغباری در ایران طی سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۴ رو به افزایش بوده که کاهش متوسط بارندگی و حذف مراتع سطوح خشک در زمین‌های محلی و فرامحلی در ایران و آسیای جنوب غربی دلیل عمدهٔ افزایش طوفان‌های گردوغباری است (برومندی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۶). در بیشتر مناطق ایران، بیشترین طوفان‌های گردوغباری در فصل تابستان و تیرماه و کمترین آن در ماه‌های آذر و دی اتفاق می‌افتد (زنگنه، ۱۳۹۳: ۱)؛ اما در استان فارس شرایط به‌گونه‌ای است که بیشینهٔ این رویداد محیطی در ماه‌های فصل بهار است (امیدوار و امیدی، ۱۳۹۲: ۹۴). در این مطالعه بررسی فصلی طوفان‌های گردوغبار در جنوب استان فارس همسان با نتایج دیگر محققان در غرب و جنوب غربی ایران (بهروزی و همکاران، ۱۳۹۸؛ ترکاشوند و کیانی، ۱۳۹۶؛ خوش‌کیش و همکاران، ۱۳۹۰) بوده که نشان دادند بیشترین وقوع گردوغبار در ماه‌های فصل بهار اتفاق می‌افتد که دلیل هواشناختی آن بادهای شمال است که با استقرار سیستم فروبار حرارتی در خلیج‌فارس شروع به فعالیت می‌نماید (الجومایلی و ابراهیم، ۲۰۱۳: ۸۵۱). تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی به تغییراتی در وقوع پدیده‌های حدی و مخاطرات جوی در مناطق خشک و نیمه‌خشک منجر شده است؛ به‌گونه‌ای‌که نتایج پژوهش امیدوار و امیدی (۱۳۹۲: ۸۵) نشان داد در سال‌های بین ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۸ بیشینهٔ وقوع طوفان‌های گردوغباری استان فارس در ایستگاه لار به ثبت رسیده است؛ اما نتایج این پژوهش نشان داد که در دورهٔ آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ تعداد طوفان‌های گردوغبار در استان فارس تغییر کرده و بیشینهٔ آن در ایستگاه فسا و جهرم است که فراوانی طوفان‌های گردوغبار بیش از چهل مورد در سال است و در ایستگاه لار فراوانی سالانهٔ آن کمتر از بیست مورد مشاهده شد.

از مدل‌های پُرکاربرد در زمینهٔ محاسبهٔ مسیر و پخش ذرات جوی، مدل های‌اسپلیت است که دراکسلر و همکاران (۲۰۱۴) از آن برای انتقال و پخش آلودگی در واشنگتن استفاده کردند. در این مطالعه نیز به‌منظور دقیق‌ترشدن مسیر انتقال، پخش و چشمهٔ طوفان گردوغبار موردی در سال ۲۰۱۸ از مدل های‌اسپلیت استفاده شد که مسیر ذرات خاک در ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰، و ۳۰۰۰ متری از سطح زمین را نمایش داده و منابع اصلی طوفان‌های گردوغباری جنوب استان فارس را محدوده‌ای در حد فاصل مرکز تا شمال عراق، شرق سوریه تا شمال عربستان شناسایی کرده و همسان با نتایج دیگر محققان بود (ریوندی و همکاران، ۱۳۹۲؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۱). محققان بین‌المللی نیز مدل های‌اسپلیت را برای منشأیابی کانون طوفان‌های گردوغبار در استرالیا (مک‌گوان و کلارک، ۲۰۰۸) و چین (وانگ، ۲۰۱۱) استفاده کردند و نتایج مثبتی از این مدل گرفتند.

عبور بادهای شمال از روی بیابان‌های خشک و عاری از پوشش گیاهی در جنوب عراق و ربع‌الخالی عربستان رسوبات نرم و سست آبرفتی را می‌روبد و به صورت تودهٔ عظیم گردوغبار وارد اتمسفر ایران می‌کند. این ذرات غبار و خاک بیابانی حاوی عناصر و فلزات سنگین مختلفی است که غلظت آن در محیطهای پذیرنده و میزبان متفاوت است (صلاحی و بهروزی، ۱۳۹۸). غلظت فلزات سنگین همچون سرب، روی، و کادمیوم در گردوغبارهای کنار جاده‌ای در کنیا (قارهٔ آفریقا) بیش از استاندارد آن بود که دلیل عمدهٔ آن ذرات معلق ناشی از ترافیک و تردد خودروهاست (می‌نا و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۵۱). در اصفهان نیز غلظت فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، نیکل، مس، و کرم در ذرات غبار شهری بیش‌ازحد استاندارد بوده که ترافیک شهری و طوفان‌های گردوغبار دلیل عمدهٔ آن است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۶۶). میزان سرب در طوفان‌های گردوغبار زاهدان حدود ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (عبدالهی و همکاران، ۲۰۱۸) و در اهواز (کریمیان و همکاران، ۱۳۹۵) فلزات سنگین سرب، روی، و کادمیوم تقریباً غلظت یکسانی با نتایج این پژوهش داشت.

اغلب مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ بررسی غلظت فلزات سنگین در طوفان‌های گردوغبار عمدتاً با نصب تله‌های رسوب‌گیر یا نشست ذرات غبار روی اجسام است؛ اما در این پژوهش غلظت فلزات سنگین ناشی از طوفان‌های گردوغبار در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم بررسی شد و می‌توان از نتایج آن در غلظت فلزات در زنجیرهٔ غذایی استفاده کرد؛ به‌گونه‌ای‌که نتایج این پژوهش نشان داد غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم‌های زراعی گندم در جنوب استان فارس بالاتر از حد استاندارد موجود در خاک است و بیشینهٔ این فلزات در اکوسیستم‌های زراعی گندم در داراب و سپس لار بود. نتایج محققان نشان داده است که گندم مهم‌ترین مسیرِ در معرض قرارگرفتن انسان با عناصر سنگین است و بلع خاک نیز در این موضوع سهیم است (خیرآبادی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۷). اکوسیستم‌های زراعی گندم اهواز، که در معرض وقوع طوفان‌های گردوغبار قرار دارند، شدیداً درگیر مسئلهٔ حاد وجود فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی است و پژوهشگران نشان دادند که غلظت کروم و نیکل در خاک‌های زراعی گندم اهواز بیش از حد استانداردهای جهانی است که بیان شد دلیل عمدهٔ آن رسوب ذرات غبار بیابانی است که تحت سیطرهٔ بادهای شمال، از بیابان‌های عراق و سوریه وارد استان خوزستان می‌شوند (راست‌منش و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۴). نتایج این پژوهش نیز بیانگر همین موضوع است و غلظت نیکل در خاک‌های زراعی گندم، به‌ویژه در داراب و لار، بیش از حد استاندارد بوده و بر اساس فاکتور زمین‌انباشت آلودگی در طبقهٔ آلودگی متوسط و شدید قرار گرفتند؛ اما در زمان‌های قبل از وقوع گردوغبار، که در زمستان اندازه‌گیری شد، ریزش‌های جوی به آبشویی فلزات سنگین و انتقال آن به عمق‌های بیشتر خاک منجر شده است. جذب و انتقال فلزات سنگین موجود در خاک از طریق ریشه موجب افزایش غلظت آن در گندم می‌شود و در همدان غلظت این فلزات در نان مصرفی اندازه‌گیری شد و نتایج حاکی از غلظت بالای کادمیوم در نان بود که دلیل اصلی آن را افزایش مصرف کودهای فسفاته و آب فاضلاب شهری معرفی کردند (کیان‌پور و سبحان اردکانی، ۱۳۹۶: ۸۳). در خاک‌های کشاورزی استان زنجان گردوغبار اثری بر افزایش غلظت فلزات سنگین ندارد (افشاری و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۶). منابع مختلفی هستند که نقش مهمی در وجود فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی دارند؛ به‌طوری‌که در شمال غرب تهران تردد خودروها و نزدیکی به صنایع و شهرها دلیل اصلی آن است (پرداختی و زاهد، ۱۳۹۷: ۷۷۸). در آلودگی خاک پارک‌های شهری مونته‌نگر و صربستان، کادمیوم آلایندهٔ اصلی معرفی شد که ترافیک عامل اصلی آن است (موگوسا و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۹۳). در چین نیز ترافیک به افزایش بالای غلظت سرب در خاک‌های اطراف جاده منجر شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷:). در بخش مرکزی سیستان غلظت آهن، سرب، نیکل، روی، و مس کمتر از حد مجاز سازمان جهانی بهداشت بود (جوان سیامردی و همکاران، ۱۳۹۳: ۴۶). کارخانه‌های ذوب فلزات نیز تأثیر بسزایی در افزایش غلظت فلزاتی همچون

سرب، روی، کادمیوم، مس، و نقره در خاک‌های اطراف این کارخانه‌ها دارند (استرکمان و همکاران، ۲۰۰۲). در جنوب لهستان نیز وجود کارخانه و صنایع فعال به افزایش غلظت فلزات سنگین به‌ویژه سرب و کادمیوم در خاک‌های زراعی منجر شده است (گرید، ۱۹۹۲: ۱۷۵). در مطالعات نیز عمدتاً به تأثیر کودهای مصرفی، فاضلاب شهری، صنایع فعال، و ترافیک جاده‌ای بر غلظت فلزات سنگین در خاک پرداخته شده است؛ اما در پژوهش حاضر به اثر گردوغبار بیابانی بر غلظت فلزات سنگین در خاک اکوسیستم‌های زراعی پرداخته شد و غلظت آن‌ها در زمان قبل و بعد از وقوع گردوغبار اندازه‌گیری شد و اختلاف آن‌ها با آزمون آماری مقایسه شد و نتایج مطالعات نشان داد غلظت سرب و کادمیوم در خاک اکوسیستم‌های زراعی گندم تحت تأثیر طوفان‌های گردوغبار افزایش یافته و غلظت نیکل تغییری نکرده است. همچنین، استاندارد آلودگی زمین‌انباشت نشان داد که در اکوسیستم‌های زراعی گندم داراب غلظت همهٔ فلزات بیشتر از حد مجاز جهانی بوده و در طبقهٔ آلودگی متوسط تا شدید قرار گرفت.

خاک بستر فعالیت موجودات زنده و زندگی انسان است که به‌وسیلهٔ فلزات سنگین ناشی از ریزگردهای مهاجر می‌تواند آشفته شود و این منبع باارزش محیطی بلااستفاده بماند (ری و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۶۵). همان‌طورکه بیان شد، علاوه بر ریزگردهای ناشی از منابع معدنی همچون کارخانهٔ سیمان، معدن‌های آهن و مس، و رگه‌های معدنی– فلزی، ریزگردهای بیابانی نیز حاوی فلزات سنگین است که پیامدهای اکولوژیکی آن قابل بحث است. ریزگردهای حاوی فلزات سنگین از طریق فعالیت‌های میکروبی بر محیط زیست خاک اثر می‌گذارد. حشرات، پستانداران، بی‌مهرگان، و میکروخاکزی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند (گال و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۰۱). گیاهان دارویی که برای بهداشت و سلامت انسان استفاده می‌شوند، بایستی عاری از هرگونه مواد سمی و فلزی باشد؛ اما ریزگردهای حاوی فلزات سنگین با رسوب بر خاک زراعی گیاهان دارویی و جذب آن‌ها توسط ریشه‌های گیاه موجب آلودگی گیاه دارویی شده که درنهایت بر سلامت انسان اثر منفی می‌گذارد (ری و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۲۰). محققان چینی نشان دادند که رسوب ریزگردهای حاوی فلزات سنگین بر خاک گیاه داروی فنگ‌دان موجب آلودگی این گیاه می‌شود (شن و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۹). خاکی که برای سبزیجات گلخانه استفاده می‌شود اگر حاوی فلزات سنگین باشد، آلاینده‌تر از خاکی است که در فضای آزاد در مقابل نور مستقیم خورشید قرار دارد؛ چون کمبود نور خورشید و رطوبت بالای گلخانه موجب تحریک فعالیت زیستی فلزات سنگین در خاک می‌شود (بولان و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۰۳). ریزگردهایی که در خاک زیرِ تاج گیاهان و درختان رسوب می‌کنند، درنهایت، جذب ریشهٔ گیاه می‌شود و فیزیولوژی گیاه را دچار اختلال می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۷: ۷۶). نتایج این مطالعه نیز نشان داد که رسوب ذرات غبار ناشی از طوفان‌های گردوغبار در خاک‌های زراعی گندم به افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک منجر می‌شود و جذب آن به‌وسیلهٔ ریشهٔ گیاهان و انتقال آن به محصول سلامت انسان را در معرض بیماری قرار می‌دهد. چون گندم از غذاهای پُرمصرف انسان است و انتقال فلزات سمی و سنگین از طریق خاک، ریشه، و گیاه به گندم باعث تجمع آن در گندم می‌شود؛ بنابراین، برای رسیدن به محصولات باکیفیت و بهداشت جهانی، می‌بایست راهکارهایی برای کاهش غلظت فلزات سنگین در محصولات مصرفی ارائه کرد. نتایج این پژوهش می‌تواند در اختیار برنامه‌ریزان و متخصصان کشاورزی و بهداشت قرار بگیرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی حوزهٔ معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شده است که بدین‌وسیله بابت این همکاری از آن سازمان محترم قدردانی می‌نمایم.

منابع

اتابکی، م.ر. و لطفی، ع. (۱۳۹۷). بررسی غلظت فلزات سنگین (سرب، کادمیوم، روی، و مس) در خاک مناطق مختلف اصفهان در سال ۱۳۹۶، فصل‌نامهٔ پژوهش در بهداشت محیط، ۴(۱): ۲۱-۳۰.

احمدی دوآبی، ش.؛ افیونی، م.؛ خادمی، ح. و کرمی، م. (۱۳۹۵). آنالیز آماری آلودگی فلزات سنگین در گردوغبار اتمسفری استان کرمانشاه، نشریهٔ علوم آب‌وخاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۰(۷۶): ۲۹-۴۳.

افشاری، ع.؛ خادمی، ح. و حجتی، س. (۱۳۹۴). ارزیابی پتانسیل خطرپذیری آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مرکزی استان زنجان بر اساس انواع شاخص‌های آلودگی، نشریهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۶): ۲۱-۴۰.

امیدوار، ک. و امیدی، ز. (۱۳۹۲). تحلیل پدیدهٔ گردوغبار در جنوب و مرکز استان فارس، مجلهٔ کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۱: ۸۵-۱۱۴.

بهروزی، م.؛ بازگیر، س.؛ نوری، ح.؛ نجاتیان، م.ع. و اخضری، د. (۱۳۹۸). شناسایی کانون‌های گردوغبار و بررسی اثرهای آن بر برخی صفات رویشی و زایشی انگور در دشت ملایر، مجلهٔ مهندسی اکوسیستم بیابان، ۸(۲۳): ۵۹-۷۲.

بهروش، ف.؛ محمودی قرایی، م.ح.؛ قاسم‌زاده، ف. و عوض‌مقدم، س. (۱۳۹۴). بررسی آلودگی فلزات سنگین در غبارهای ترافیکی شهر مشهد و تعیین منشأ آن با استفاده از روش استخراج ترکیبی، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست، ۹۵: ۱۴۱-۱۵۰.

پرداختی، ع.ر. و زاهد، ف. (۱۳۹۷). ارزیابی شاخص‌های آلودگی و ریسک اکولوژیکی مربوط به فلزات سنگین در خاک‌های اطراف جاده‌های برون‌شهری ایران، نشریهٔ مطالعات علوم محیط زیست، ۳(۳): ۷۶۹-۷۸۱.

ترکاشوند، م.ق.؛ و کیانی، م. (۱۳۹۶). تجزیه‌وتحلیل وضعیت آلودگی هوا ناشی از اثرات اقلیمی ریزگردها و طوفان‌های گردوغبار در مناطق جنوبی استان همدان، مجلهٔ علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۹(۴): ۱۵-۳۳.

جوان سیامردی، ص.؛ رضایی کهخا، م.ر.؛ صفایی مقدم، ع. و نوری، ر. (۱۳۹۳). بررسی غلظت فلزات سنگین (آهن، نیکل، مس، روی، سرب) در خاک کشاورزی بخش مرکزی سیستان، نشریهٔ مهندسی بهداشت محیط، ۲(۱): ۴۶-۵۳.

خوش‌کیش، ا.؛ علیجانی، ب. و حجازی‌زاده، ز. (۱۳۹۰). تحلیل سینوپتیکی گردوغبار در استان لرستان، نشریهٔ تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۱(۲۱): ۹۱-۱۱۰.

خیرآبادی، ح.؛ افیونی، م.؛ ایوبی، ش.ا. و سفیانیان، ع.ر. (۱۳۹۴). ارزیابی خطر ناشی از فلزات سنگین در خاک و گیاهان زراعی خوراکی عمده در استان همدان، نشریهٔ علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۹(۷۴): ۲۷-۳۷.

راست‌منش، ف.؛ مراونی، ف.؛ مهرابی کوشکی، م. و زراسوندی، ع.ر. (۱۳۹۴). ارزیابی غنی‌شدگی فلزات سنگین در مزارع گندم شهر اهواز، نشریهٔ علوم و مهندسی محیط زیست، ۲(۴): ۱۹-۳۱.

رجبی، م. و سوری، ب. (۱۳۹۴). ارزیابی مقادیر فلزات سنگین در ذرات گردوغبار باریده بر شهرهای سنندج، خرم‌آباد و اندیمشک در غرب ایران ۱۳۹۱-۱۳۹۲، مجلهٔ سلامت و محیط، ۸(۱): ۱۱-۲۲.

ریوندی، ا.؛ میررکنی، م. و محمدی‌ها، ا. (۱۳۹۲). بررسی تشکیل و انتشار طوفان‌های گردوغبار ورودی به غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاگرانژی ذرات HYSPLI، نشریهٔ پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۴(۱۳، ۱۴): ۱۶-۱.

زنگنه، م. (۱۳۹۳). آب و هواشناسی طوفان‌های گردوغبار در ایران، دو فصل‌نامهٔ آب و هواشناسی کاربردی، ۱(۱): ۱-۱۲.

سلمان‌زاده، م.؛ سعیدی، م.ف. و نبی بیدهندی، غ.ر. (۱۳۹۱). آلودگی فلزات سنگین در غبارهای ته‌نشین‌شدهٔ خیابانی شهر تهران و ارزیابی زیست‌اکولوژی آن‌ها، مجلهٔ محیط‌شناسی، ۶۱: ۹-۱۸.

سیستانی، ن.پ.؛ معین‌الدینی، م.؛ خراسانی، ن.ا.؛ حمیدیان، ا.ح.؛ علی طالشی، م.ص. و عظیمی یانچشمه، ر. (۱۳۹۶). آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان: ارزیابی غنای فلزی و درجهٔ آلودگی، مجلهٔ سلامت و محیط زیست، ۱۰(۱): ۷۵-۸۶.

صلاحی، ب. و بهروزی، م. (۱۳۹۸). شناسایی کانون گردوغبار و آنالیز فیزیکوشیمیایی ذرات آن در ایستگاه دزفول، طرح پژوهشی، معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی.

عزیزی، ق.؛ شمسی‌پور، ع.ا.؛ میری، م. و صفر راد، ط. (۱۳۹۱). تحلیل آماری – همدیدی پدیدهٔ گردوغبار در نیمهٔ غربی ایران، مجلهٔ محیط‌شناسی، ۳۸(۳): ۱۲۳-۱۳۴.

کریمیان، ب.؛ لندی، ا.؛ حجتی، س. و احدیان، ج. (۱۳۹۵). بررسی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، و کانی‌شناسی گردوغبار شهر اهواز، مجلهٔ تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۱): ۱۵۹-۱۷۳.

کیان‌پور، س. و سبحان اردکانی، س. (۱۳۹۶). بررسی غلظت‌های روی، سرب، کادمیوم، و مس در گندم و نان مصرفی در شهر همدان، مجلهٔ بهداشت مواد غذایی، ۷(۲۸): ۸۱-۹۸.

Abdollahi, S.; Karimi, A.; Madadi, M.; Ostad-Ali-Askari, K.; Eslamian, S. and Singh, V. P. (2018). Lead Concentration in Dust Fall in Zahedan, Sistan and Baluchistan Province, Iran, Journal of Geography and Cartography, 1(2).

Afshari, A.; Khademi, H. and Hojjati, S. (2016). Assessment of Heavy Metals Pollution Risk In Soils of Central Zanjan Province Based on Pollution Indices, Journal of Water And Soil Conservation, 22(6): 21-40.

Agricultural Statistics of Fars Province (2015). Fars Agricultural Jihad Organization, Deputy of Planning and Economics, Bureau of Statistics and Information Technology and Network Equipment.

Ahmadi Doabi, SH.; Afyuni, M.; Khademi, H. and Karami, M. (2016). Statistical Analysis of Heavy Metal Contamination in Atmospheric Dusts of Kermanshah Province, Iran, Journal of Water and Soil Science, 20 (76): 29-43.

Al-Jumaily, K. J. and Ibrahim, M. K. (2013). Analysis of synoptic situation for dust storms in Iraq, International Journal. Energ. Environ, 4(5): 851-858.

Altaş, L. (2009). Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic granular sludge, Journal of hazardous materials, 162(2-3): 1551-1556.

Atabaki, M.R. and Lotfi, A. (2018). Investigation of Heavy Metal Soil Concentration (Pb, Cd, Zn and Cu) In Different Areas of Isfahan in 2017, Journal of Research in Environmental Health, 4(1): 23-35.

Azizi, Gh.: Shamsipour, A. A.; Miri, M. and Safarrad, T. (2012). Statistic and Synoptic Analysis of Dust Phenomena in West of Iran, Journal of Environment Studies, 38(3): 123-134.

Behravesh, F.; Mahmudy Gharaie, M. H.; Ghassemzadeh, F. and Avaz Moghaddam, S. (2015). Determination of Heavy Metals Pollution In Traffic Dust of Mashhad City, and Its Origin by Using “Selective Sequential Extraction” (SSE) Procedure, Journal Engineering and Environmental Geology, 24(95): 141-150.

Behrouzi, M.; Bazgeer, S.; Nouri, H.; Nejatian, M.A. and Akhzari, D. (2019). Dust Storms Detection and Its Impacts on the Growth and Reproductive Traits of Grape Vine (Vitis Vinifera) In Malayer Plain, Journal of Desert Ecosystem Engineering, 8(23): 59-72.

Bolan, S.; Kunhikrishnan, A.; Seshadri, B.; Choppala, G.; Naidu, R.; Bolan, N.S.; Ok, Y.S.; Zhang, M.; Li, C.G.; Li, F. and Noller, B. (2017). Sources, distribution, bioavailability, toxicity, and risk assessment of heavy metal (loid) s in complementary medicines, Environment international, 108: 103-118.

Broomandi, P.; Dabir, B.; Bonakdarpour, B. and Rashidi, Y. (2017). Identification of dust storm origin in South–West of Iran, Journal of Environmental Health Science and Engineering, 15(1): 16.

Draxler, R.; Stunder, B.; Rolph, G.; Stein, A. and Taylor, A. (2014). Hysplit4 User's Guide Version 4.9, 2009, September.

Gall, J.E.; Boyd, R.S. and Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review, Environmental monitoring and assessment, 187(4): 201.

Geraid R. (1992). The identification of point soures of heavy metal in industrially impacted water way by peripnyton and surface sediment monitoring. Water Air Soil Pollut, 65: 175-90.

Jaradat, Q.M.; Momani, K.A.; Jbarah, A-AQ. and Massadeh, A. (2004). Inorganic analysis of dust fall and office dust in an industrial area of Jordan, Environmental Research, 96(2): 139-44.

Javan Siamardi, S.; Rezaee Kahkha, M. R.; Safaei Moghaddam, A. and Noori, R. (2014). Survey of Heavy Metals Concentration (Fe ،Ni ،Cu ،Zn ،Pb) In Farmland Soils of Sistan Central Part, Journal Of Environmental Health Engineering, 2(1): 46-53.

Karimian, B.; Landi, A.; Hojati, S. and Ahadian, J. (2016). Physicochemical and Mineralogical Characteristics of Dust Particles Deposited In Ahvaz City, Iranian Journal of Soil and Water Research, 47(1): 159-173.

Kheirabadi, H.; Afyuni, M.; Ayoubi, S. and Sofianian, A.R. (2016). Risk Assessment of Heavy Metals In Soils And Major Food Crops in the Province of Hamadan, Journal of Hydrology and Soil Science, 19(4): 27-38.

Khuzestani, R.B. and Souri, B. (2013). Evaluation of heavy metal contamination hazards in nuisance dust particles, in Kurdistan Province, western Iran, Journal of Environmental Sciences, 25(7): 1346-54.

Kianpoor, S. and Sobhanardakani, S. (2017). Evaluation of Zn, Pb, Cd and Cu Concentrations in Wheat and Bread Consumed In Hamedan City, Journal of Food Hygiene, 7 (28): 83-92.

Koshkish, A.; Alijani, B. and Hejazizadeh, Z. (2011). Synoptic Analysis of Dust Storms in Tthe Lorestan Province, Iran, Journal of Geographical Science, 18(21): 91-110.

Li, F.L.; Shi, W.; Jin, Z.F.; Wu, H.M. and Sheng, G.D. (2017). Excessive uptake of heavy metals by greenhouse vegetables, Journal of Geochemical Exploration, 173, 76-84.

Lu, X. L.; Wang, K. L. J.; Huang and Zhai, Y. (2009). Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. J. Hazard. Mater, 161: 1058-1062.

Maina, E. G.; Gachanja, A. N.; Gatari, M. J. and Price, H. (2018). Demonstrating PM 2.5 and road-side dust pollution by heavy metals along Thika superhighway in Kenya, sub-Saharan Africa, Environmental monitoring and assessment, 190(4): 251.

McGowan, H. and Clark, A. (2008). Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit, Atmospheric Environment, 42(29): 6915-6925.

Mugoša, B.; Đurović, D.; Nedović-Vuković, M.; Barjaktarović-Labović, S. and Vrvić, M. (2016). Assessment of ecological risk of heavy metal contamination in coastal municipalities of Montenegro, International journal of environmental research and public health, 13(4): 393.

Omidvar, K. and Omidi, Z. (2013). The Analysis of Dust Phenomenon in the Southern and Central Fars Province, Journal of Geographical Research on Desert Areas, 1(1): 85-114.

Pardakhti, A.R. and Zahedi, F. (2018). Pollution Indices and Ecological Risk Assessment For Heavy Metals in Side Soils of Interurban Roads, Iran, Journal of Environmental Sciences Studies, 3(3): 769-781.

Rai, P.K.; Lee, J.; Kailasa, S.K.; Kwon, E.E.; Tsang, Y.F.; Ok, Y.S. and Kim, K.H. (2018). A critical review of ferrate (VI)-based remediation of soil and groundwater, Environmental research, 160: 420-448.

Rai, P.K.; Lee, S.S.; Zhang, M.; Tsang, Y.F. and Kim, K.H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management, Environment International, 125: 365-385.

Rajabi, M. and Souri, B. (2015). Evaluation of Heavy Metals among Dust fall Particles of Sanandaj, Khorramabad and Andimeshk Cities in Western Iran2012-2013, IRANIAN Journal of Health and Environment, 8(1): 11-22.

Rastmanesh, F.; Maravani, F.; Mehrabi Koshki, M. and Zarasondi, A.R. (2015). Evaluation of Heavy Metal Enrichment in Wheat Farms of Ahvaz, Journal of Environmental Science and Engineering, 5(8): 19-21.

Rivandi, A.; Mirrokni, M. and Mohammadiha, A. (2013). Investigation of Formation and Propagation of Dust Storms Entering to the West And Southwest of Iran Using Lagrangian Particle Diffusion Model, HYSPLIT, Journal of Climate Research, 13: 1-16.

Salahi, B. and Behrouzi, M. (2018). Detection Of Dust Source And Physico-Chemical Analysis of Dust Particles at Dezful Station, Department of Physical Geography, Faculty of Literature and Humanities, University Of Mohaghegh Ardebili.

Salmanzadeh, M.; Saeedi, M. and Bidheni, GH. N. (2012). Heavy Metals Pollution in Street Dusts of Tehran and Their Ecological Risk Assessment, Journal of Environmental Studies, 38(1): 9-18.

Shen, Z.J.; Chen, Y.S. and Zhang, Z. (2017). Heavy metals translocation and accumulation from the rhizosphere soils to the edible parts of the medicinal plant Fengdan (Paeonia ostii) grown on a metal mining area, China. Ecotoxicology and environmental safety, 143: 19-27.

Sistani, N.; Moeinaddini, M.; Khorasani, N.; Hamidian, A. H.; Ali-Taleshi, M. S.; Azimi Yancheshmeh, R. (2017). Heavy Metal Pollution in Soils nearby Kerman Steel Industry: Metal Richness and Degree of Contamination Assessment, Journal of Health and Environment, 10(1): 75-86.

Soleimani, M.; Amini, N.; Sadeghian, B.; Wang, D. and Fang, L. (2018). Heavy metals and their source identification in particulate matter ($PM_{2.5}$) in Isfahan City, Iran, Journal of Environmental Sciences, 72: 166-175.

Sterckeman, T.; Douay, F.; Proix, N.; Fourrier, H. and Perdrix, E. (2002). Assessment of the contamination of cultivated soils by eighteen trace elements around smelters in the North of France, Water, Air, and Soil Pollution, 135(1-4): 173-194.

Tokalioglu, S. and Kartal, S. (2006). Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the organized industrial district in Kayseri (Turkey), Atmos. Environ, 40: 2797-2805.

Torkashvand, M. GH and Kiani, M. (2018). Analysis of Air Pollution Status Caused By Climatic Effects of Aerosols and Dust Storms in South Regions of Hamadan Province, Journal of Environmental Science and Technology, 19(4): 15-33.

Wang, Y.; Stein, A.F.; Draxler, R.R.; de la Rosa, J. and Zhang, X. (2011). Global sand and dust storms in 2008: Observation and HYSPLIT model verification, Atmospheric Environment 45(35): 6368-6381.

Xuan, J.; Sokolik, I. N.; Hao, J.; Guo, F.; Mao, H. and Yang, G. (2004). Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia, Atmospheric Environment, 38(36): 6239-6252.

Zanganeh, M. (2014). Climatological Analysis of Dust Storms in Iran, Journal of Applied Climatology, 1(1): 1-12.

Zhang, H.; Wu, C.; Gong, J.; Yuan, X.; Wang, Q.; Pei, W. and Zhang, H. (2017). Assessment of heavy metal contamination in roadside soils along the Shenyang-Dalian Highway in Liaoning Province China, Polish Journal of Environmental Studies, 26(4).